

Т.С. Айрапетян¹, А.С. Карагяур²¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна²Харківський національний університет будівництва та архітектури, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ В АЕРОТЕНКУ-ВИТИСКУВАЧІ З БІОЦЕНОЗОМ, ЗАКРІПЛЕНОМУ НА ЦИЛІНДРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Представлені результати теоретичних досліджень процесу біологічного очищення стічних вод в аеротенках-витискувачах, що містять додаткове завантаження з біоценозом, закріпленим на циліндричних елементах. Дослідження проведені за допомогою математичного моделювання. Враховується вплив кисневого режиму. Оцінено вплив вмісту органічних забруднень та кисню на процес біологічного окислення у біоплівці для елементів циліндричної та прямокутної форми.

Ключові слова: стічні води, аеротенк-витискувач, циліндричні елементи, закріплений біоценоз, органічні забруднення, математична модель.

Постановка проблеми

В технології очищення господарсько-побутових стічних вод важливим етапом є видалення органічних забруднень (ОЗ). Для цієї мети в основному використовуються біологічні методи, засновані на біохімічному окисненні органічних домішок спеціальними мікроорганізмами (активним мулом, біоплівкою) в процесі своєї життєдіяльності.

На станціях біологічного очищення широкого поширення набули аеротенки, в яких видалення ОЗ здійснюється зваженим біоценозом - активним мулом. Зростаючі вимоги до якості очищення стічних вод не дозволяють вважати роботу аеротенків традиційної конструкції задовільною. Дані споруди не можуть забезпечити глибоке видалення ОЗ, необхідно передбачати додаткові споруди для доочистки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В зв'язку з підвищеними вимогами до якості очищення стічних вод технології застосування аеротенків потребують подальшого вдосконалення [1].

Ефективність вилучення забруднень в аеротенках можна значно підвищити за рахунок влаштування додаткового завантаження (насадок, сіток і т.п.), на поверхні якого утворюється біоплівка з високою концентрацією мікроорганізмів. При цьому передбачається, що окислення ОЗ закріпленим біоценозом на додатковому завантаженні відбувається одночасно з окисленням зваженим біоценозом (активним мулом) в об'ємі споруди [2, 3]. Ефективність застосування додаткового завантаження пояснюється тим, що при малих концентраціях ОЗ іммобілізова-

ний біоценоз володіє кращою здатністю до вилучення за рахунок того, що константа напівнасичення в рівнянні, що описує кінетику окислення, має менше значення [4]. Крім того, на додатковому завантаженні можливе створення закріпленого біоценозу набагато більших концентрацій, ніж зваженого.

Механізми вилучення ОЗ активним мулом ґрунтовно досліджені і наведені зокрема в роботах [4, 5]. Останнім часом широко досліджуються вилучення ОЗ закріпленим біоценозом на краплинних та затоплених фільтрах [6-8].

При розрахунку роботи аеротенків з додатковим завантаженням необхідно розглядати одночасне окислення ОЗ активним мулом та біоплівкою. В роботах [9, 10] представлена математична модель та приклади розрахунків для аеротенків-витискувачів з урахуванням кисневого режиму. Але дослідження проведені для насадків прямокутної форми. На практиці найчастіше використовуються насадки циліндричної форми. Це можуть бути стержні, нитки, ворс та інші елементи, що дозволяють створити значну поверхню, через яку відбувається масообмін між вільним об'ємом аеротенку та закріпленим біоценозом. У зв'язку з цим, розроблена математична модель потребує уточнення. Також необхідні додаткові дослідження для обґрунтування ефективності застосування циліндричних насадок.

Формулювання мети статті

Метою статті є вивчення за допомогою математичного моделювання процесу біологічного очищення в аеротенках-витискувачах, що містять завантаження у вигляді циліндричних насадок, на яких іммобілізовано додатковий біоценоз.

Виклад основного матеріалу

При розробці математичної моделі, яка описує процес біологічного очищення в аеротенку-витискувачі, що містить циліндричні елементи з закріпленими біоценозом, прийняті наступні припущення:

- 1) процес утилізації субстрату зваженим та закріпленим біоценозом, а також процес споживання кисню у біоплівці, є усталеними;
- 2) в результаті інтенсивної аерації процес біохімічного окислення у вільному об'ємі аеротенку в достатній кількості забезпечений киснем, тобто тут його концентрація має сталі значення; надходження кисню лімітує кінетику біоокислення тільки закріпленим біоценозом;
- 3) дифузійним переносом субстрату у вільному об'ємі аеротенку можна знехтувати;
- 4) товщина біоплівки на додаткових елементах є сталою величиною;
- 5) при зміні місця розташування та розподілення елементів з закріпленим біоценозом по довжині аеротенку їх кількість та площа залишається однаковою, тобто змінюється тільки питома площа (щільність розподілення).

З урахуванням прийнятих припущень основу математичної моделі складають наступні рівняння та залежності:

1) Рівняння переносу органічних забруднень по довжині аеротенку

$$V \frac{dL_a}{dx} + R_\delta + \varepsilon R_a = 0, \quad (1)$$

де x - горизонтальна координата, м, яка змінюється в межах від 0 до S (довжина аеротенку); t - час, с; L_a - концентрація ОЗ в аеротенку, мг/л; $V=Q_a/F$ - середня швидкість потоку в аеротенку, м/с; F - площа поперечного перетину аеротенку, м²; Q_a - витрата води, що очищується, м³/с; $R_\delta = \lambda_\delta N_L$ - швидкість утилізації ОЗ закріпленим біоценозом в об'ємі аеротенку, мг/(л·с); R_a - швидкість утилізації ОЗ зваженим біоценозом, мг/(л·с); N_L - потік (транспорт) ОЗ через поверхню біоплівки для їх утилізації закріпленим біоценозом (біоплівкою), $\frac{м}{с} \frac{мг}{л}$;

$\lambda_\delta = F_{\delta l}/F$ - конструктивний параметр, м⁻¹; $F_{\delta l}$ - питома площа поверхні біоплівки (на одиницю довжини аеротенку), м; $\varepsilon = 1 - \frac{W_\delta}{W_a} = \frac{W_p}{W_a}$ - коефіцієнт, що вра-

ховує зменшення вільного об'єму аеротенку за рахунок розміщення додаткового завантаження з закріпленим біоценозом; W_a - робочий об'єм аеротенку, м³; W_p - об'єм рідини в аеротенку, м³; W_δ - об'єм завантаження з закріпленим біоценозом, м³.

Рівняння (1) вирішується при наступній граничній умові: $x = 0 \quad L_a = L_{a0}$, де L_{a0} - концентрація ОЗ у вихідній воді, мг/л.

2) Рівняння переносу органічних забруднень по товщині біоплівки (необхідно для обчислення параметра N_L)

$$D_L \left(\frac{d^2 L}{dr^2} + \frac{dL}{r dr} \right) - R_L = 0, \quad (2)$$

де r - координата, м, яка змінюється в межах від R до $R+\delta$; R - радіус стержнів завантаження, м, на якому розташовується біоплівка; δ - товщина біоплівки, м; L - концентрація ОЗ в біоплівці, мг/л; D_L - коефіцієнт молекулярної дифузії в біоплівці, м²/с; R_L - швидкість утилізації ОЗ закріпленим біоценозом в біоплівці, мг/(л·с).

Рівняння (2) вирішується при наступних граничних умовах:

$$\begin{aligned} r = R \quad \frac{dL}{dr} &= 0; \\ r = R + \delta \quad N_L &= -D_L \frac{dL}{dr} = K_L (L_a - L|_{r=R+\delta}), \\ L|_{r=R+\delta} &= L_\delta, \end{aligned} \quad (3)$$

де K_L - коефіцієнт масопереносу ОЗ в рідинній плівці, м/с; L_δ - концентрація ОЗ на поверхні біоплівки, мг/л.

3) Рівняння кінетики (залежності для визначення швидкості утилізації ОЗ зваженим та закріпленим біоценозом R_a та R_L , а також швидкості споживання кисню в біоплівці R_C)

$$R_a = -\frac{\mu_a X_a}{Y_a} \frac{L_a}{K_{mLa} + L_a}, \quad (4)$$

$$R_L = -\frac{\mu_L X_L}{Y_L} \frac{L}{K_{mL} + L} \frac{C}{K_{mC} + C}, \quad (5)$$

$$R_C = \alpha_1 R_L + \alpha_2 b_L \frac{C}{K_{mC} + C} X_L, \quad (6)$$

де μ_a , μ_L - максимальна питома швидкість зростання біомаси мікроорганізмів, відповідно, в зваженому біоценозі та біоплівці, с⁻¹; K_{mLa} , K_{mL} , K_{mC} - константи напівнасичення, мг/л; X_a , X_L - концентрації мікроорганізмів, мг/л; Y_a , Y_L - коефіцієнти трансформації субстрату у біомасу; R_C - швидкість споживання кисню в біоплівці, мг/(л·с); C - концентрація кисню в біоплівці, мг/л; α_1 , α_2 - стехіометричні коефіцієнти витрати кисню

при окисленні одиниці ОЗ та для самоокислення продуктів відмирання мікроорганізмів у біоплівці; b_L - константа відмирання мікроорганізмів в біоплівці, c^{-1} .

4) Рівняння переносу кисню по товщині біоплівки

$$D_C \left(\frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{dC}{r dr} \right) - R_C = 0, \quad (7)$$

де D_C - коефіцієнт молекулярної дифузії кисню в біоплівці, m^2/c .

Рівняння (7) вирішується при наступних граничних умовах:

$$\begin{aligned} r = R \quad \frac{dC}{dr} &= 0; \\ r = R + \delta \quad N_C &= -D_C \frac{dC}{dr} = K_L (C_a - C|_{r=R+\delta}), \\ C|_{r=R+\delta} &= C_\delta, \end{aligned} \quad (8)$$

де K_C - коефіцієнт масопереносу кисню в рідинній плівці, m/c ; C_δ - концентрація кисню на поверхні біоплівки, mg/l .

б) Залежність для розрахунку коефіцієнта ϵ при розташуванні насадок не по всій довжині споруди, а тільки в її частині, з урахуванням збереження їх об'єму і, відповідно, збільшення щільності розподілу

$$\epsilon = 1 - (1 - \epsilon_0) \frac{S}{S_L}, \quad (9)$$

де ϵ_0 - коефіцієнт зменшення вільного об'єму аеротенку при рівномірному розташуванні насадок по всій довжині споруди; S_L - довжина ділянки аеротенку, на якому розташовані насадки, m .

Система рівнянь та залежностей (1-9), яка складає основу математичної моделі, вирішується числовим способом методом кінцевих різниць. За допомогою математичної моделі були проведені числові дослідження процесу біологічної очистки в аеротенку-витискувачі, що містить циліндричні елементи з закріпленим біоценозом, з урахуванням кисневого режиму в біоплівці.

В якості критерію ефективності прийнято параметр, що дозволяє оцінити вклад закріпленого біоценозу в біологічне очищення від органічних забруднень

$$E = 1 - \frac{(L_a^{ex})_L}{(L_a^{ex})_a},$$

де $(L_a^{ex})_L$ - концентрація ОЗ на виході з аеротенка-витискувача з закріпленим біоценозом, mg/l ;

$(L_a^{ex})_a$ - концентрація ОЗ на виході з аеротенка-витискувача традиційної конструкції, mg/l .

На рис. 1 представлено приклад розрахунку приведеної довжини S_L/S ділянки з закріпленим біоценозом на ефективність роботи споруди E . Виконано порівняння для насадок прямокутної та циліндричної форми. Розрахунки виконані для однакової площі поверхні біоплівки.

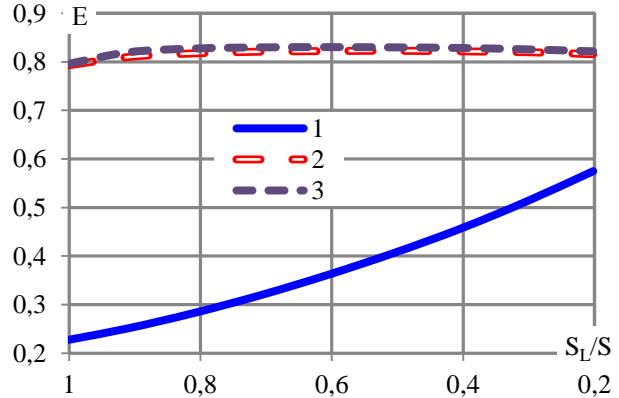


Рис. 1. Вплив розташування елементів з закріпленим біоценозом на ефективність роботи аеротенку при застосуванні насадок:

- 1 - прямокутної форми;
- 2 - циліндричної форми;
- 3 - циліндричної форми (без врахування кисневого режиму)

Дані, представлені на рис. 1, показують, що використання насадок циліндричної форми значно підсилює ефект застосування закріпленого біоценозу. При цьому відбувається більш повне насичення біоплівки киснем, його вміст менш лімітує процес окислення органічних забруднень.

Для підтвердження цієї думки проведено додаткові розрахунки, результат яких представлено на рис. 2. Ці дані показують розподіл кисню (рис. 2а), органічних забруднень (рис. 2б) по товщині біоплівки та демонструють вклад вмісту кисню (рис. 2в) та ОЗ (рис. 2г) в процес окислення при застосуванні насадок різної форми. На рис. 2в та 2г параметри $(R_L)_C$ та $(R_L)_L$ являють собою

$$R_{L\ L} = \frac{L}{K_{mL} + L}; \quad R_{L\ C} = \frac{C}{K_{mC} + C}.$$

Краща якість очищення при застосуванні циліндричних насадок з закріпленим біоценозом у порівнянні з насадками прямокутної форми пояснюється тим, що в цьому випадку біоплівка при тій же площі поверхні контакту має менший об'єм. В результаті відбувається більш повне насичення киснем по всій товщині біоплівки, його вміст менш лімітує процес окислення.

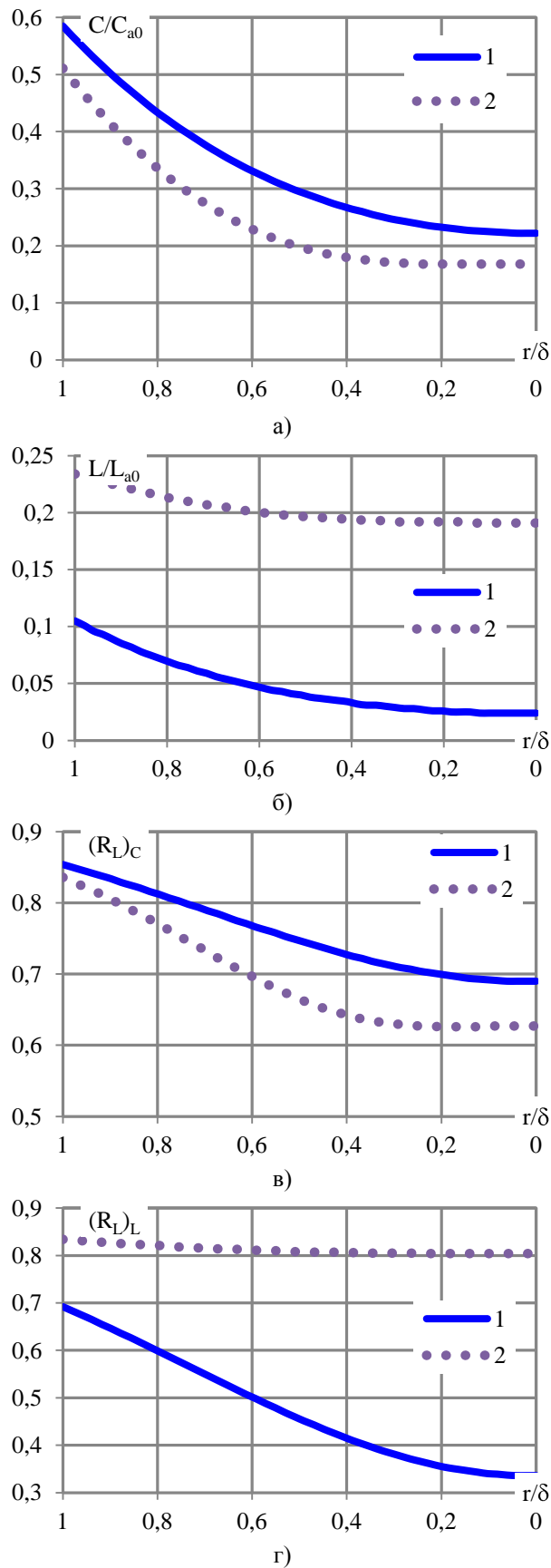


Рис. 2. Розподіл по товщині біоплівки кисню (а), органічних забруднень (б), параметрів $(R_L)_C$ (в) та $(R_L)_L$ (г) при застосуванні насадків циліндричної (1) та прямокутної (2) форми

На рис. 3 та 4 представлено приклади розрахунку впливу на якість очищення розмірів циліндричних насадок R.

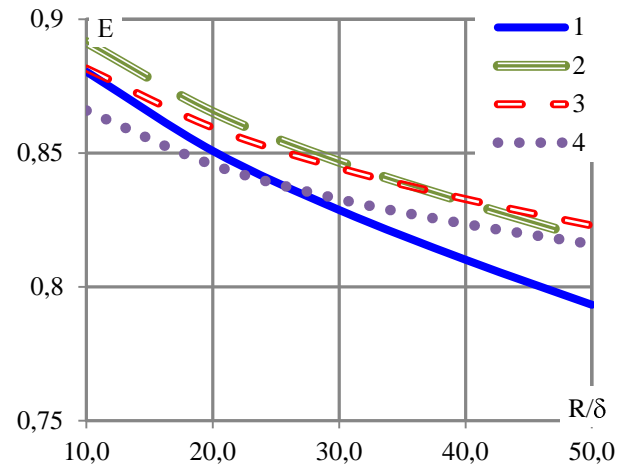


Рис. 3. Вплив на ефект очищення радіусу циліндричних насадок при різній щільності їх розташування:

- 1 - $S_L/S = 1$;
- 2 - $S_L/S = 0,8$;
- 3 - $S_L/S = 0,5$;
- 4 - $S_L/S = 0,2$

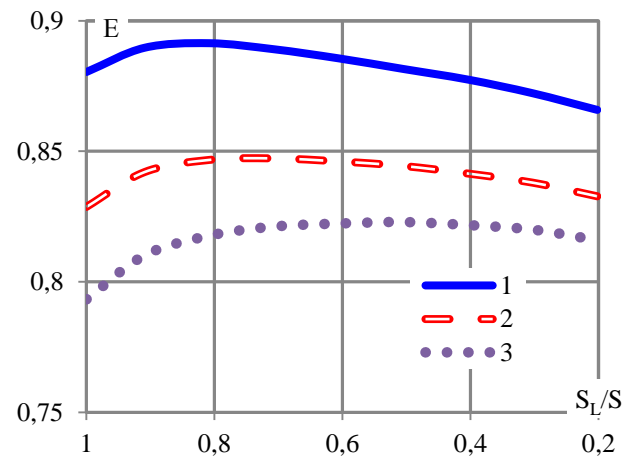


Рис. 4. Вплив на ефект очищення щільності розташування циліндричних насадок при різних значеннях радіусу:

- 1 - $R/\delta = 10$;
- 2 - $R/\delta = 30$;
- 3 - $R/\delta = 50$;

Дані, представлені на рис. 3 та 4, підтверджують, що зі зменшенням радіусу циліндричної насадки, коли зменшується об'єм біоплівки та лімітуючий вплив концентрації кисню, покращується ефект очищення.

Наявність на графіках рис. 4 екстремуму можна пояснити тим, що в цьому діапазоні параметру S_L/S вміст кисню та органічних забруднень впливають на процес окислення приблизно однаково.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Математичне моделювання процесу біологічного очищення в аеротенку-витискувачі з вільноплаваючим та закріпленим біоценозом дозволило обґрунтувати ефективність застосування насадок циліндричної форми у порівнянні з елементами прямокутної форми. В цьому випадку біоплівка, що на них розташована, краще насичується киснем, його лімітуюча дія зменшується, покращується якість очищення.

В подальших дослідженнях планується експериментально перевірити результати теоретичних досліджень та розглянути випадок, коли вміст кисню зменшується у вільному об'ємі аеротенку на тих ділянках, де розташоване додаткове завантаження з закріпленим біоценозом.

Література

1. Von Sperling, M., (2007). Biological wastewater treatment series. Vol 5: *Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. London: IWA Publishing, 328.
2. Gebara, F. (1999). Activated sludge biofilm waste water treatment system. *Wat. Res.*, 13(1), 230-238.
3. Олійник, О. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом [Текст] / О. Олійник, Т. Айрапетян // Доповіді НАНУ. – К., 2015. – №5. – С. 55-59.
4. Henze, M., M. Van Loosdrecht, M.C., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). Biological Wastewater Treatment. Iwa Publishing, London, 511.
5. Святенко, А.І. Дослідження зміни ефективності очищення стічних вод в аеротенках під впливом різних чинників [Текст] / А.І. Святенко, Н.М. Дяденко, Т.Г. Нечипоренко-Шабуніна // Екологічна безпека. – 2011. – №11. – С. 64–66.
6. Liao, Q., Tian, X., Chen, R., Zhu, X. (2007). Mathematical model for gas liquid two-phase flow and biodegradation of a low concentration volatile organic compound (VOC) in a trickling biofilter. *Internal. J. of Heat and Mass Transfer*, 1–13.
7. Wanner, O., Ebert, N.I., Rittman, B.E. (2006). Matematical modeling of biofilms. *Scientificand Technical report*, 18, 208.
8. Kolpakova, O. (2015). Theoretical studies and calculations of wastewater treatment in trickling biofilters MOTROL. *Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences, Lublin-Rzeszow*, 17(8), 165-173.
9. Oleynik, A., Airapetian, T. (2017) Oxygen regime in research on the work of plugflow aeration tanks with fixed biomasses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10 (88), 4-12.
10. Айрапетян, Т.С. Визначення раціональних параметрів аеротенків-витискувачів з закріпленим біоценозом та врахуванням кисневого режиму [Текст] / Т.С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 28. – С. 12-18.

References

1. Von Sperling, M., (2007). Biological wastewater treatment series. Vol 5: *Activated sludge and aerobic biofilm reactors*. London: IWA Publishing, 328.
2. Gebara, F. (1999). Activated sludge biofilm waste water treatment system. *Wat. Res.*, 13(1), 230-238.
3. Oleynik, A., Airapetian, T. (2015). Modelling of the waste water treatment from the organic contaminations in the bioreactors-aerotanks with suspended (free flowing) and fixed biocenosis. *Reports of the National Academy of the Sciences of the Ukraine*, 5, 56-61 (in Ukrainian).
4. Henze, M., M. Van Loosdrecht, M.C., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. (2008). Biological Wastewater Treatment. Iwa Publishing, London, 511.
5. Svyatenko, A., Dyadenko, N., Nechiporenko-Shabunina, T. (2011). Research of change of efficiency of sewage treatment in aerotanks under the influence of different factors. *Ecological safety*, 1, 64–66.
6. Liao, Q., Tian, X., Chen, R., Zhu, X. (2007). Mathematical model for gas liquid two-phase flow and biodegradation of a low concentration volatile organic compound (VOC) in a trickling biofilter. *Internal. J. of Heat and Mass Transfer*, 1–13.
7. Wanner, O., Ebert, N.I., Rittman, B.E. (2006). Matematical modeling of biofilms. *Scientificand Technical report*, 18, 208.
8. Kolpakova, O. (2015). Theoretical studies and calculations of wastewater treatment in trickling biofilters MOTROL. *Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences, Lublin-Rzeszow*, 17(8), 165-173.
9. Oleynik, A., Airapetian, T. (2017) Oxygen regime in research on the work of plugflow aeration tanks with fixed biomasses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/10 (88), 4-12.
10. Airapetian, T. (2017) Determination of rational parameters of aerotanks- displacers with fixed biocenosis and taking into account the oxygen regime. *Problems of water supply, sewerage and hydraulic*. Kyiv, KNUCA, 28, 12-18.

Рецензент: д. т. н., проф. В.О. Юрченко, Харківський національний університет будівництва та архітектури, Україна

Автор: АЙРАПЕТЯН Тамара Степанівна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail - tamara78kh2008@rambler.ru
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8834-5622>

Автор: КАРАГЯУР Андрій Степанович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри водопостачання, каналізації і гідравліки
Харківський національний університет будівництва та архітектури
E mail – karagiaur@rambler.ru
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8868-3189>

MODELING OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL PURIFICATION IN AEROTANK-DISPLACER WITH BIOCECENOSIS, FIXED ON CYLINDRICAL ELEMENTS

T. Airapetian¹, A. Karahiaur²

¹O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

²Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine

Biological purification is an important element in the technology of processing household waste water. At many biological purification stations aerotanks are used. At relatively low concentrations of organic pollution, aerotanks-displacer are used. An analysis of existing methods of intensifying the work of aerotanks showed that the application of fixed biocenose is promising. The location of the immobilized biocenose is assumed to be on elements of various shapes. The fixed biocenose has the best extraction ability. The concentration of the fixed biocenose is much greater than the concentration of active sludge.

A two-level mathematical model of biological purification in aerotanks-displacers with fixed biocenosis is improved. Elements with an fixed biocenosis of cylindrical shape are considered. The model takes into account the degree of oxygen supply on the process. The mathematical model is based on the equations of transport along the length of the aerotank of the concentration organic pollution and also the equation of transport of organic pollution and the oxygen over the thickness of the biofilm. These equations are written in a cylindrical coordinate system. The rate of oxidation of organic pollution and oxygen consumption by a suspended and fixed biocenosis is described by the Mono equation. The system of equations is solved by the method of finite differences. The results of theoretical studies of the influence of the oxygen regime, and also the location and distribution of elements with an fixed biocenosis on the purification efficiency are presented.

The efficiency of using cylindrical and rectangular elements is compared. The advantages of cylindrical elements are explained. When using cylindrical elements, their arrangement along the length of the aerotank has less influence in comparison with elements of a rectangular shape. The distribution of the concentration of organic pollution and the concentration of oxygen in the thickness of the biofilm using elements of cylindrical and rectangular shape was studied. The contribution of the concentration of organic pollution and the concentration of oxygen on the oxidation process in biofilm is estimated, and their limiting effect is estimated. When using cylindrical elements, the limiting effect of the oxygen regime decreases. When using cylindrical elements, the volume of biofilm decreases, more complete oxygenation is performed, and the process of oxidation of organic pollution is greatly intensified.

Keywords: wastewater, aerotank-displacer, cylindrical elements, fixed biocenosis, organic pollution, mathematical model